**Вин Ту. Сравнительный анализ эффективности использования различных схем спектрального регулирования запаса реактивности в реакторах на тепловых нейтронах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.03 / Вин Ту; [Место защиты: Нац. исслед. ядерный ун-т].- Москва, 2013.- 93 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-5/1515**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

04201 353-21 5

«МИФИ»

На правах рукописи

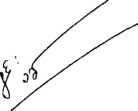
Вин Ту

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Специальность 05.14.03 -ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Автор:



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ кандидат физико-математических наук, доцент В. И. Савандер

Москва 2013

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА I. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЫГОРАНИЯ

ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ

РЕГУЛИРОВАНИЕМ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ. ... 11

1. Физические основы спектрального регулирования

запаса реактивности 11

1. [Методика расчетного анализа 13](#bookmark6)
2. [Постановка задачи в точечном приближении 15](#bookmark10)
3. Схема численного решения задачи в точечном

приближении 18

1. Применение полиячеечных моделей для анализа различных схем спектрального регулирования

на основе программного комплекса GETERA 19

1. Сопоставление результаты точечной модели и расчетов

по программе GETERA 23

ГЛАВА II. АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ

РЕАЛИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ 26

1. Компенсация запаса реактивности с помощью

вытеснителей 26

1. Методика расчета ТВС с вытеснителями

по программному комплексу GETERA 28

1. Использование в качестве теплоносителя смесь

тяжелой и обычной воды 31

1. Регулирование плотности воды или парового

содержания в воде по высоте ТВ С 33

1. Нейтронно-физические характеристики проекта

реактора ВВЭР с микротвэлами 34

1. Способ реализации спектрального регулирования

нейтронов в высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе ВТГР 39

ГЛАВА III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА

РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР-1000. . 50

1. Спектральное регулирование запаса реактивности путем

изменения плотности теплоносителя 50

1. Обсуждение результатов 55
2. Расчетные исследования спектрального регулирования запаса реактивности с помощью

ТВС с вытеснителями 60

1. Результаты расчетных исследований спектрального

регулирования запаса реактивности путем изменения содержания легкой и тяжелой воды в теплоносителе.... 67

ГЛАВА IV. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

СПЕКТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР

В ЗАМКНУТОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ 74

* 1. Методика расчетного анализа расхода природного

урана топлива подпитки при использовании регенерированного урана и плутония в условиях применения спектрального регулирования запаса реактивности 74

* 1. Результаты расчетного анализа расхода природного урана при частичных перегрузках топлива и спектральном регулировании запаса реактивности 76
  2. Снижение диапазона изменения водо-топливного отношения за счет частичного использования выгорающих поглотителей 80
  3. Расчетный анализ расхода природного урана топлива подпитки при использовании регенерированного урана в условиях применения спектрального регулирования в ториевом

топливном цикле 84

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 88

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 90

ВВЕДЕІ-ІИЕ

В реакторах типа ВВЭР, которые являются реакторами корпусного ти­па, для повышения выгорания выгружаемого топлива применяют частичные перегрузки топлива. Частичные перегрузки топлива характеризуются тем, что в один прием выгружается лишь часть ТВС, достигших наибольшего вы­горания. При фиксированном обогащении топлива подпитки увеличение кратности перегрузки приводит к повышению выгорания топлива и сниже­нию запаса реактивности, резервируемой в системе компенсации избыточной реактивности. Однако повышение кратности перегрузок увеличивает относи­тельное время простоя реактора, что отрицательно сказывается на коэффици­енте использования установленной мощности (КИУМ) [1].

С целью повышения КИУМ предлагается внедрять удлиненные кампа­нии вплоть до полутора-двух лет [2]. Увеличение длительности одной кампа­нии реактора приводит к повышению запаса реактивности. Используемые в настоящее время системы компенсации избыточной реактивности основаны на поглощении нейтронов в сильных поглотителях, как, например, природ­ный бор (жидкостная система компенсации) и гадолиний (выгорающий по­глотитель [3], интегрированный в топливную матрицу). Потери нейтронов в системе компенсации в результате их бесполезного поглощения нейтронов, снижает эффективность использования топлива в этих реакторах.

Известен другой способ компенсации избыточной реактивности, так называемое спектральное регулирование, при котором в процессе выгорания топлива производится изменение водо-топливного отношения [4]. Под водо­топливным отношением мы будем понимать число ядер водорода, основного замедлителя нейтронов, приходящегося на одно ядро урана (топлива). При уменьшении водо-топливного отношения резко повышается резонансное по­глощение нейтронов на ядрах 238U, что приводит к снижению *К„* решетки твэлов в ТВС. Поэтому изменяя водо-топливное отношение в реакторе мож­но поддерживать его критичность. Следовательно, для свежей топливной за-

4

грузки при спектральном регулировании избыточные нейтроны будут в ос-

^30 <330

новном поглощаться ядрами " U, что приведет к повышению наработки ‘ Ри в топливе. В дальнейшем с увеличением водо-топливного отношения и при­ближением его к оптимальному значению происходит выжигание этого плу­тония, что позволяет надеяться на повышении удельной энерговыработки топлива.

Таким образом, если создать техническое устройство, позволяющее изменять водо-топливное отношение в процессе эксплуатации реактора, то начальный запас реактивности может быть скомпенсирован уменьшением водо-топливного отношения. В дальнейшем по мере выгорания топлива и снижения реактивности необходимо увеличивать водо-топливное отношение и тем самым поддерживать критичность реактора.

Концепция реакторов с регулируемым спектром нейтронов исследуется значительное время, так как физические основы такого способа организации работы реактора вытекают напрямую из зависимости коэффициента размно­жения среды от вероятности избежать резонансного поглощения нейтронов. Значительная часть научных исследований в области спектрального регули­рования посвящена повышению энергоиспользования топлива легководных реакторов. Имеются способы реализации спектрального регулирования запа­са реактивности, как механическим путем применения специальных вытес­нителей, так и путем разбавления замедлителя (воды) материалами с худши­ми свойствами замедления нейтронов.

Для применения вытеснителей в качестве регулятора водо-топливного отношения в ТВС необходимо осуществить модернизацию конструкции су­ществующей ТВС. В работе [5] описаны модернизированные конструкции ТВС с различным количеством вытеснителей и предлагалось уменьшать диаметр твэла. В данной диссертационной работе так же рассмотрены мо­дернизированные конструкции ТВС с различными количествами как цирко­ниевых, так и урановых вытеснителей, но при сохранении диаметра твэла.

Рассмотрен вариант смеси тяжелой и легкой воды, так что по мере вы­горания топлива содержание тяжелой компоненты уменьшается. В этом ва­рианте температура и давление теплоносителя практически не меняются, что является положительным фактором, но требуются большие расходы тяжелой воды. Концепция реакторов типа ВВЭР с микротвэлами позволяет использо­вать спектральное регулирование запаса реактивности путем изменения па- росодержания в теплоносителе-замедлителе в процессе выгорания топлива в реакторе.

В работе [6] описано преимущество использования микротвэлов в лег­ководных реакторах с точки зрения безопасности. Основное преимущество использования микротвэлов (сфера диаметром 1-2 мм), непосредственно омываемых легководным теплоносителем, в сравнении с традиционным таб­леточным топливом в оболочке из циркониевого сплава является более чем в 10 раз большая удельная поверхность теплообмена. При большой удельной поверхности почти отсутствуют ограничения, связанные с кризисом тепло­обмена. Это позволяет допустить объемное кипение теплоносителя с боль­шим массовым теплосодержанием в тепловыделяющих сборках (ТВС) со «свежим» топливом для осуществления спектрального регулирования запаса реактивности на выгорание.

В работе рассмотрен способ реализации спектрального регулирования запаса реактивности в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах с шаровыми твэлами. В этих реакторах осуществляется непрерывная перегруз­ка топлива и отсутствует необходимость в создании системы компенсации избыточной реактивности. Однако изменение графито-топливного отноше­ния в процессе кампании может привести к большему накоплению и исполь­зованию вторичного топлива с целью повышения выгорания.

Программа развития ядерной энергетики России на длительную пер­спективу предполагает замыкание ядерного топливного цикла путем перера­ботки отработавшего ядерного топлива и вовлечение в ядерную энергетику

реакторов на быстрых нейтронах. Поэтому в диссертационной работе рас-

6

сматривается применение спектрального регулирования запаса реактивности в реакторах типа ВВЭР в замкнутом топливном цикле. Предполагалось, что отработавшее ядерное топливо реакторов типа ВВЭР-1000 будет проходить радиохимическую переработку с выделением регенерированного урана и наработанного плутония. Регенерированный уран после добавления обога­щенного урана будет возвращаться в топливный цикл реактора, а плутоний с высоким содержанием четных изотопов будет использоваться в реакторах на быстрых нейтронах.

В данной диссертационной работе создана математическая модель вы­горания топлива в точечном приближении. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов математической модели и расчетов с помощью про­граммного комплекса GETERA при спектральном регулировании запаса ре­активности [7]. Поскольку точечная модель выгорания приводит к большим погрешностям то расчетный анализ производился главным образом по про­граммному комплексу GETERA на уровне представления ТВС в идее набора полиячеек. Описываются методики расчетов для ТВС реактора типа ВВЭР, ТВС с вытеснителями и ТВС с коллекторами.

**Актуальность работы**

Спектральное регулирование запаса реактивности в реакторах с ча­стичными перегрузками топлива позволяют в открытом и замкнутом топлив­ных циклах повысить выгорание топлива без изменения обогащения. Сниже­ние расхода природного урана на топливо подпитки в реакторах на тепловых нейтронах является актуальной задачей для современного этапа развития ядерной энергетики.

**Цель работы**

Целью настоящей работы являлось выявление нейтронно-физических особенностей различных способов организации спектрального регулирова­ния запаса реактивности в тепловых реакторах и оценка преимуществ спек-

7

трального регулирования запаса реактивности с точки зрения повышения вы­горания топлива и снижения расхода природного урана в открытом и замкну­том топливном цикле ядерной энергетики.

В работе осуществлялось решение следующих прикладных задач.

* Разработка численных методов анализа нейтронно-физических характе­ристик ядерных реакторов при использовании спектрального регулирова­ния запаса реактивности на основе полиячеечных моделей и метода веро­ятности первых столкновений.
* Сравнительный анализ различных технических способов реализации спектрального регулирования в реакторах на тепловых нейтронах.
* Определение величины максимального эффекта в повышении выгорания топлива при спектральном регулировании запаса реактивности в реакто­рах на тепловых нейтронах с уран-плутониевым и уран-ториевым топли­вом при работе в открытом и замкнутом топливном цикле.

**Научная новизна диссертационной работы**

* Разработана методика расчета выгорания топлива в ТВС реактора типа ВВЭР-1000 с различными техническими способами осуществления спек­трального регулирования на основе метода вероятности первых столкно­вений и с использованием программного комплекса GETERA.
* Впервые показано, что величина дополнительного выигрыша в выгора­нии топлива при непрерывном характере спектрального регулировании запаса реактивности в реакторе типа ВВЭР-1000 не зависит от конкретно­го способа реализации спектрального регулирования.
* Рассмотрено применение спектрального регулирования и получены оцен­ки выигрыша от его применения при работе реактора типа ВВЭР-1000 в замкнутом топливном цикле с повторным использованием регенериро­ванного урана и плутония с низким содержанием четных изотопов.

**Практическая значимость работы**

* Разработанная методика расчета выгорания топлива в ТВС реактора типа ВВЭР-1000 с использованием программного комплекса GETERA на ос­нове детального описания структуры ТВС с помощью полиячеек может быть использована при расчетах ТВС с микротвэльной засыпкой при раз­личных схемах частичных перегрузок топлива.
* Расчетный анализ различных технических способов осуществления спек­трального регулирования может быть использован при практической реа­лизации спектрального регулирования запаса реактивности в перспектив­ных реакторах с ториевым топливным циклом.
* Полученные результаты расчетного анализа с повторным использованием регенерированного урана и плутония могут служить основой для проек­тирования реакторов с регулируемым спектром нейтронов в замкнутом топливном цикле.

**Основные положения, выносимые на защиту**

* Разработанная полиячеечная модель процесса выгорания ядерного топли­ва в бесконечной решетке ТВС, в которой критичность поддерживается за счет изменения водо-топливного отношения различными техническими способами.
* Результаты расчетно-теоретического анализа выгорания топлива при осуществлении спектрального регулирования в уран-плутониевом и уран- ториевом топливном циклах.
* Результаты и выводы использования регенерированного урана и плуто­ния для топлива подпитки реакторов типа ВВЭР-1000 при работе в за­мкнутом топливном цикле со спектральным регулированием запаса реак­тивности.

**Достоверность полученных результатов и выводов** базируется на использовании широко апробированного в реакторных расчетах программно­го комплекса GETERA, совпадении результатов тестовых расчетов для из­вестных вариантов топливных циклов ВВЭР и физической непротиворечиво­сти результатов расчетов.

**Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиогра­фии. Работа изложена на 92 страницах, содержит 30 таблицы, 18 рисунков и список цитируемой литературы из 28 наименований.

**Апробация работы**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на XVI и XVII школах-семинарах по проблемам физики реакторов «ВОЛГА-2010» и «ВОЛГА-2012»; на Научных сессиях НИЯУ МИФИ в 2010, 2011 и2012г.г.

**Публикации**

По теме диссертации опубликовано 5 работ в научных журналах и сборниках трудов конференций и семинаров, в том числе 2 статьи в рецензи­руемых журналах.

Основной задачей представленной диссертационной работы являлся физический анализ возможностей повышения эффективности использования топлива в реакторах на тепловых нейтронах за счет применения спектрально­го регулирования запаса реактивности. Проведенный расчетный анализ раз­личных способов организации спектрального регулирования в реакторах ти­па ВВЭР-1000 показал масштаб возможного эффекта в повышении выгора­ния, который оказался на уровне *1-М %* для уран-плутониевого топливного цикла.

Применение в качестве технической основы спектрального регулиро­вания схемы с вытеснителями требует существенного изменения конструк­ции ТВС реакторов и создание дополнительной системы управления вытес­нителями. Поэтому для внедрения такого способа повышения выгорания топлива требуется тщательный экономический анализ. Но заранее очевидно, что для современной ситуации, когда стоимость природного урана относи­тельно невелика и топливная составляющая стоимости э/э, производимой на АЭС не превышает 15-20 *%,* такие серьезные изменения ТВС и создание до­полнительной системы управления вытеснителями вряд ли окажутся выгод­ными.

Однако в замкнутом топливном цикле, когда стоимость топлива суще­ственно повысится, ситуация не будет столь однозначной. В этом случае как показано в работе, выигрыш в расходе природного урана на топливо подпит­ки за счет применения спектрального регулирования увеличивается до 15- 20%. Кроме того, вариант организации спектрального регулирования на ос­нове изменения соотношения доли тяжелой компоненты в теплоносителе может быть экономически выгодным для реакторов малой мощности, в кото­рых требуемые объемы теплоносителя и расход тяжелой воды может быть приемлемым. При этом способе спектрального регулирования запаса реак­тивности не требуется кардинального изменения конструкции ТВС.

88

Что же касается дальней перспективы, то введение ториевого топлив­ного цикла в реакторах водо-водяного типа, дает возможность за счет приме­нения спектрального регулирования повысить эффективность использования урана-233, накапливаемого в экранах реакторов на быстрых нейтронах, на 32-40 %, что уже является существенной величиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ипатов П.Л.Оценка системной эффективности АЭС с ВВЭР с учетом ре­гиональных факторов. - Атомная энергия. 2008. т. 104. № 3. с. 131-137.
2. Семченков Ю.М., Павлов В.И. И др. Использование топлива в ВВЭР- 1000: состояние и перспективы. - Атомная энергия, 2007. т. 102. вып. 3. с. 139-146.
3. Савандер В.И., Белоусов Н.И. Альдавахра С., Методика расчета и анализ применения гранулированных поглотителей в ВВЭР. - Атомная энергия. 2006. т. 100. № 1. с. 8-12.
4. Савандер В.И., Увакин М.А. Расчет глубокого выгорания ядерного топ­лива в решетках с регулируемым спектром нейтронов. - Атомная энергия, 2005. т. 98. вып. 6. с. 429-435.
5. Духовенский А.С. Универсальный реактор. - Журнал "Росэнергоатом", сентябрь, 2009. №9. с. 26-29.
6. Гришанин Е.И., Филиппов Г.А и другие. Оценка стойкости защитных по­крытий микротвэлов в паровой среде при взаимодействии с конструкци­онными материалами. - Атомная энергия, 2009. т. 106. вып. 3. с. 153-158.
7. Пряничников А.В. Описание программы GETERA. - ВАНТ, сер. ФЯР, вып. 3, 2009, с. 63-77.
8. Чибиняев А.В., Алексеев П.Н., и др. Оценка влияния регулирования нейтронного спектра на глубину выгорания топлива ВВЭР-1000. - Атом­ная энергия. 2006. т. 101. вып. 3. с. 231-233.
9. Савандер В.И.,Увакин М.А. Сравнительный анализ различных способов достижения больших глубин выгорания в реакторных системах без ис­пользования дополнительных поглотителей. - Известия вузов, сер. Ядер­ная Энергетика, 2005, вып. 2, с. 86-91.
10. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.:2001. с. 363-375.
11. Список программных пакетов для численного анализа. <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_numerical_analysis_software>.
12. Денисов В. П., Драгунов 10. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. .-480 с.
13. С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, А.А., и др, Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР: учебное посо­бие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 376 с.
14. Белоусов Н.И., Пряничников А.В., Бычков С.А. Использование метода вероятностей первых столкновений для расчета ячеек реакторов со слож­ной геометрией. - Инженерная физика, 2002, вып. 4.
15. Гришанин Е.И., Кухаркин Н.Е. Инновация с микротвэлами. - Журнал "Росэнергоатом", сентябрь, 2009. №9. с. 30-36.
16. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых кон­стант БНАБ-93. Часть 1: нейтронные и фотонные ядерные константы. — ВАНТ, сер. Ядерные константы, 1996, вып. 1.
17. Савандер В.И., Вин Ту., Белоусов Н.И. Методика расчета выгорания топ­лива при спектральном регулировании запаса реактивности в реакторах типа ВВЭР. - Вестник национального исследовательского ядерного уни­верситета “МИФИ”, 2012, т. 1, № 2, с. 210-215.
18. Пономарев-Степной Н.Н., Кухаркин Н.Е., Хрулев А.А. и др. Перспекти­вы применения микротвэлов в ВВЭР. - Атомная энергия. 1999. т. 86. вып.
19. с. 443-449.
20. Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Кондитеров М.В. и др. Эксперименталь­ное исследование работоспособности защитных оболочек микротвэлов применительно к условиям тяжелых аварий легководных реакторов. — Атомная энергия. 2007. т. 103. № 5. с. 302-309.
21. Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Фальковский J1.H. и др. Оценка стойко­сти защитных покрытий микротвэлов в парогазовой среде при взаимо­действии с конструкционными материалами. - Атомная энергия. 2009. т. 106. №3. с. 153-158.
22. Фонарев Б.И., Гришанин Е.И., Фальковский J1.H. и др. Возможные пути создания одноконтурного энергоблока АЭС с легководным теплоносите­лем сверхкритического давления и активной зоной на основе микротоп- ливных элементов. - Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспе­чение безопасности АЭС. 2011. № 30. с. 146-158.